Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 6, Jan.-Feb. 2021, p. 1337-1349

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۳۴۹-۱۳۳۷

مقاله پژوهشی

تغییر اقلیم در ایران از دیدگاه تغییرات آب قابل بارش، نم ویژه و باد برداری

سید محمد جعفر ناظم السادات[1*]- لیلی عباسی[2]- صدیقه مهرآور[3]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۲

چکیده

تغییرات زمستانه اقلیمی ایران و بخش‌هایی از کشورهای همسایه با بررسی تغییرات مکانی- زمانی پراسنج‌های آب قابل بارش و نم‌ویژه و باد برداری ارزیابی شد. در این راستا، اندازه ماهانه ژانویه تا مارس این پراسنج‌ها برای دوره ۲۰۱۷-۱۹۶۰ در پیکسل‌های $2/5^o$ * $2/5^o$ از داده‌های نسخه دوم بازتحلیل سازمان ملی جوی و اقیانوسی آمریکا فراهم گردید. چند ویژگی آماری (مانند میانگین فصلی) این داده‌ها نخست برای در دو بازه زمانی ۲۹ ساله (۱۹۶۰ تا ۱۹۸۸ و ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷) و سپس برای پنج دوره ده ساله پیاپی و یک دوره هشت ساله (۲۰۱۷-۲۰۱۰) با هم مقایسه شد. کمترین اندازه آب قابل بارش و بیشترین اندازه نم ویژه در پهنه کوهستانی شمال‌باختری، باختر و مرکز کشور دیده شد. در سنجش با بازه۱۹۶۰ تا ۱۹۸۸، بازه زمانی ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷ با کاهش معنی‌داری در اندازه آب قابل بارش، نم ویژه، بادهای باختروزان و جنوب‌وزان به ویژه در گستره جنوب باختری ایران روبرو بود. در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۱۹۶۹، بیشترین اندازه‌های مثبت بی‌هنجاری در اندازه این پراسنج‌ها برای بخش‌های بزرگی از ایران بویژه گستره‌های باختری و جنوب باختری دیده شد. کمترین اندازه این پراسنج‌ها نیز وابسته به دوره ۲۰۰۹-۲۰۰۰ بود. به جز دوره ۱۹۹۹-۱۹۹۰، اندازه‌های آب قابل بارش و نم ویژه به گونه‌ای پیوسته برای دهه‌های پس از ۱۹۷۰ کاهش یافته است. افزایش (کاهش) سرعت بادهای باختروزان و جنوب‌وزان، با بیشتر (کم) شدن آب قابل بارش و نم ویژه در بخش‌های بزرگی از ایران همراه بوده است. در سنجش با دهه ۱۹۶۰، در دیگر دهه‌ها و بویژه دو دهه ۲۰۰۰ و ۲۰۱۷ از سرعت این بادها کاسته شده و در برابر بادهای خشک خاوروزان و شمال‌وزان چیره می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آب‌قابل‌بارش، ایران، تغییر اقلیم، نم‌ویژه

مقدمه

چهارمین گزارش ارزیابی‌های اقلیمی ایالات متحده آمریکا در پیکر دو گزارش دانشورانه در نوامبر ۲۰۱۸ در دسترس همگان قرار گرفت. در حالی‌که گزارش نخست بیشتر در برگیرنده علل رخداد و پیامدهای تغییر اقلیم است، در گزارش دوم بیشتر بر پایه روش‌های سازگاری، مدیریت ریسک، افزایش تاب‌آوری و کاهش زیان‌های این تغییرات استوار است. هم اکنون این گزارش‌ها که از دیدگاه سیاسی با بسیاری دیدگاه‌های کاخ سفید درباره اقلیم ناسازگار است، را می‌توان در درگاه الکترونیکی https://www.globalchange.gov دید. کریمی و همکاران (۱۳) پس از انجام مروری بر مقاله‌های علمی و گزارش‌هایی درباره تغییر اقلیم در ایران با انجام چند پژوهش میدانی افزون بر تاکید بر پیامدهای ویرانگرانه تغییر اقلیم، پیشنهادهایی را برای کاهش زیان‌های تغییر اقلیم در ایران ارائه نموده‌اند. برای نمونه گفته شده است که برداشت از آب‌های زیرزمینی کاهش یابد، سرمایه گذاری‌ها و کاربرد فناوری‌های نوین افزایش یابد، دولت سیاست‌های پشتیبانی مالی از کشاورزان را به گونه‌ای ساماندهی کند که آنها بتوانند مانایی منابع آب و خاک در مزرعه را افزایش دهند. آموزش‌های همگانی درباره تغییر اقلیم و پیامدهای آن و سیاست‌های پیشگیرانه از زیان بایستی گسترش یابد. امیری و اسلامیان (۳) نیز بر پایه گزارش IPCC، افزایش دمای ایران در سال ۲۱۰۰ را در سنجش با دوران کنونی، میان یک و نیم تا چهار و نیم درجه سانتی‌گراد دانسته اند.

بخار آب یکی از بنیادی‌ترین گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر زمین می‌باشد که اندازه آن در بازه‌های گوناگون زمانی و مکانی نوسان دارد (۱۵). این گاز از راه تبخیر از سطح اقیانوس‌ها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها، یخ و یخچال‌ها، تعرق از سطح گیاهان و نیز تنفس جانداران وارد اتمسفر می‌شود. اندازه نم نسبی و نم ویژه هوا در پهنه‌های استوایی دریایی بیشتر از میانگین جهانی و در گستره‌های قطبی کمتر از آن می‌باشد (۶ و ۲۳). بسیاری از گزارش‌های علمی در سال‌های اخیر

۱، ۲ و ۳- به‌ترتیب استاد، دانش آموخته کارشناسی ارشد و کارشناس ارشد بخش مهندسی آب، مرکز پژوهش‌های علوم جوی- اقیانوسی، دانشگاه شیراز
(*- نویسنده مسئول: Email:mjnazemosadat@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v34i6.76456

نقش بخار آب به عنوان یک جزء حیاتی از گازهای گلخانه‌ای در چرخش آب و هوایی و تغییر اقلیم را برجسته نموده‌اند (۹ و ۱۲). با این حال، بیشینه اندازه بخار آب تنها ۵ درصد از اتمسفر را تشکیل می‌دهد و پراکنش آن در بخش‌های گوناگون زمین بسیار ناهمگون است (۶، ۲۱ و ۲۳). بخار آب نقش مهمی در بیلان انرژی، جابجایی ماده (مولکول‌های آب) و انرژی (گرمای نهان تبخیر) و فرایند هیدرولوژیکی در هر دو مقیاس محلی و جهانی دارد. افزون براین، از آنجا که توانایی ربایش (جذب) انرژی گرمایی H_2O بیشتر از گاز CO_2 است، نقش آب در دمای کره زمین نیز یکی از چالش‌های پیش روی دانشمندان است. یادآور می‌شود که، از یک سو، توانایی یک بسته هوا برای نگهداری بخار آب وابسته به دمای آن است و از سوی دیگر توانایی جذب انرژی گرمایی یک مولکول بخار آب نزدیک به دو برابر این توان برای یک مولکول CO_2 است.

آب قابل بارش (Precipitable Water, PW) کل وزن بخار آب در ستون عمودی هوا با سطح مقطع واحد است که برحسب کیلوگرم بر متر مربع (kg/m^2) و یا میلی‌متر (mm) گفته می‌شود (۱، ۹، ۲۴ و ۱۰). هر یک کیلوگرم بر متر مربع برابر یک میلی‌متر است. به دیگر سخن، آب قابل بارش به آن مولکول‌های H_2O گفته می‌شود که در ستون هوا هستند ولی تبدیل شدن آنها به مایع یا جامد و ریزش آنها بستگی به دمای هوا و ناپایداری جو دارد. افزایش و کاهش پیوسته این پراسنج در گذر چند دهه، نمایه‌ای از تغییرات اقلیمی هر پهنه جغرافیایی است (۱۶).

پراسنج‌هایی همچون غلظت گازهای درون جو، دما (۱)، پوشش ابر (۱۷)، جهت و سرعت باد (۷)، عوامل محلی (۲۴) و از همه مهمتر نم هوا (۱۰ و ۲۴) بر اندازه آب قابل بارش سایه می‌افکنند. ارتفاع از سطح دریا بیشترین نشان را در پراکنش جغرافیایی PW دارد. با افزایش ارتفاع از سطح زمین اندازه PW کاهش می‌یابد. ناهمساز با دیدگاه بسیاری از دانشمندان که بر این باورند که با افزایش عرض جغرافیایی PW کاهش می‌یابد، عساکره و دوستکامیان (۴) نشان دادند که این اصل در گستره جو ایران کمتر به چشم می‌آید (۵).

مباشری و همکاران (۱۷) نشان دادند که باندهای ۱۸ و ۱۹ سنجنده MODIS نمایه بسنده‌ای برای برآورد PW در شرایط جوّی ایستگاه مهرآباد تهران هستند. محمدیها و همکاران (۱۸) نشان دادند که در ایستگاه هواشناسی تهران، اگر اندازه PW ابر که با رادار اندازه گیری شده است، از یک دهم میلی‌متر بیشتر شود، بارش آغاز می‌گردد. صادقی حسینی و همکاران (۱۹) اندازه آستانه PW برای باورسازی ابرهای همرفتی تهران را میان ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر (یا ۲۰ تا ۲۵ کیلوگرم بر متر مربع) برآورد نمودند. آنها نشان دادند که اگر PW کمتر از ۷ میلی‌متر باشد، نباید چشم‌داشت رخداد بارش در تهران را داشت. در برابر، اگر PW به آستانه ۴۰-۳۵ میلی‌متر برسد، احتمال وقوع سیل در تهران بسیار بالا است عساکره و دوستکامیان (۴) برای دوره ۱۹۶۲-۲۰۱۰، بیشترین (کمترین) اندازه ضریب تغییرات PW (coefficient of Variation) در ایران را در امتداد رشته کوه های زاگرس (پهنه‌های ساحلی دریای خزر و خلیج فارس) گزارش نمودند. آنها نشان دادند که در دوره برسی آنها، اندازه PW برای ۷۰٪ کشور روند کاهنده‌ای داشته است.

به وزن بخار آب موجود در هوا در یک واحد وزنی هوا نم ویژه (Specific Humidity, SH) گفته می‌شود که بر حسب گرم آب در کیلوگرم هوا سنجیده می‌شود. نم ویژه گویای شمار مولکول‌های بخار آب در هوا می‌باشد و هر چه دمای هوا بیشتر شود نم ویژه آن در مرحله اشباع بیشتر می‌گردد. کتیرایی بروجردی و همکاران (۱۴) روند تغییرات نم نسبی و نم ویژه ایران در دوره زمانی ۱۹۷۶-۲۰۰۵ میلادی را ارزیابی نمودند. یافته‌های آنان نشانگر آن است که در سنجش با دیگر فصل‌های سال، اندازه نم ویژه در تابستان بیشتر است. آنها روند سالانه نم نسبی و نم ویژه در کرانه‌های دریای خزر و خلیج فارس را مثبت و برای دیگر بخش‌های کشور منفی گزارش نمودند. پژوه (۲۲) نشان داد که گرچه روند سالانه نم ویژه در بسیاری از گستره ایران زمین کاهشی است، تنها در کناره‌های دریای خزر و بویژه کناره‌های خلیج فارس دارای روند افزایشی هستند. دهقانی و همکاران (۸) نیز گزارش نمودند که برای دوره ۱۹۵۰-۲۰۱۶ میلادی، اندازه نم ویژه در کرانه‌های خلیج فارس دارای روند افزایشی است. آنها این روند افزایشی را در پیوند با افزایش دمای هوا در این پهنه دانسته‌اند.

افزون بر آب قابل بارش و نم ویژه، تغییر در اندازه باد برداری (Vector Wind, VW) نیز از انگیزه‌های انجام این پژوهش است. باد برداری نمایه‌ای از جابجایی افقی هوا می‌باشد. واحد اندازه‌گیری آن متر بر ثانیه (m/s) و زاویه روانش باد است. بادهایی که از دریاها به سوی کشور بوزند نمناکی هوا را افزایش می‌دهند. در برابر، بادهایی که از سرزمین‌های خشک به سوی کشور روانه گردند، می‌توانند نم را از هوا زهکشی و آن را خشک‌تر کنند. ناظم السادات و همکاران نشان دادند که پدیده النینو- نوسان‌های جنوبی (ENSO) نقش ارزنده‌ای در تغییرات اقلیمی گستره‌های گوناگون کشور دارد (۲۰) اما نویسندگان نتوانستند پژوهش‌هایی را پیدا کنندکه نشان باد بر تغییر اقلیم در ایران را ارزیابی نموده باشند.

ارزیابی تغییر اقلیم در ایران از دیدگاه کاهش یا افزایش همزمان اندازه سه سنجه آب قابل بارش، نم ویژه و باد برداری تاکنون مورد توجه پژوهشگران نبوده است. چنین ارزیابی برهمکنش میان این سنجه‌ها و چرایی رخداد دوران‌های خشک و تر را روشن‌تر خواهد نمود. در این راستا اندازه آب قابل بارش، نم ویژه و باد برداری در کشور ایران و بخش‌هایی از کشورهای همسایه برای دوره ۲۰۱۷-۱۹۶۰ پردازش گردید. این دوره ۵۸ ساله در ابتدا به دو دوره ۲۹ ساله پیوسته بخش شد و تغییرات این سه پراسنج از دوره اول به دوره دوم

با یکدیگر سنجش گردید. در گام دوم این دوره به پنج دوره ده ساله و یک دوره هشت ساله بخش شد و تغییرات در اندازه PW، SH و VW برای هر دوره بررسی و با یکدیگر سنجش گردید.

مواد و روش‌ها

داده‌ها

میانگین داده‌های ماهانه سه پراسنج PW، SH (لایه ۸۵۰ میلی باری) و VW (لایه ۸۵۰ میلی‌باری) در دامنه جغرافیایی ۲۰ تا ۴۵ درجه شمالی و ۴۰ تا ۷۰ درجه خاوری (شرقی) و دوره زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۷ برای ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس از پایگاه داده‌های سازمان مدیریت جوی-اقیانوسی ایالات متحده آمریکا NCEP/NCAR[1] Reanalysis بیرون آورده شد. توانایی جداسازی مکانی این داده‌ها ۲/۵× ۲/۵ درجه طول و عرض جغرافیایی است که در تارنمای www.esrl.noaa.gov قابل دستیابی می‌باشند. برای تهیه نقشه‌ها از توانایی‌های سایت https://psl.noaa.gov/cgi-bin/data/composites/printpage.pl بهره‌گیری شد. افزون بر این از توانایی پردازش و گرافیک نرم‌افزارهای Grads و R نیز برای در هم آمیختن نقشه‌ها بهره‌برداری گردید.

روش‌ها

۱- در آغاز دوره زمانی یاد شده به دو دوره ۲۹ ساله (۱۹۶۰ تا ۱۹۸۸ و ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷) بخش گردید و میانگین PW و SH در این دو دوره با یکدیگر سنجش گردیدند.

۲- برای آگاهی بیشتر از چگونگی تغییرات پراسنجها در گذر زمان، افزون بر میانگین نقشه تفاضل اندازه این پراسنجها به همراه تفاضل VW نیز در دو دوره یاد شده ارزیابی گردید.

۳- بخش بزرگی از پردازش‌های وابسته به بندهای ۱ و ۲ برای پنج دوره زمانی ۱۰ ساله ۲۰۰۹-۱۹۶۰ و یک دوره هشت ساله ۲۰۱۷-۲۰۱۰ نیز به انجام رسید تا روشن گردد در کدامین دوره ۱۰ ساله بیشترین تغییرات در ویژگی‌های آب جوی ایران رخ داده است.

۴- از آزمون کلموگروف– اسیمرونوف (K-S test) برای ارزیابی تغییرات معنی دار در زمان و مکان بهره‌برداری شد. این آزمون هنگامی انجام می‌گیرد که بخواهیم تغییرات در اندازه یک پراسنج در یک پهنه جغرافیایی که دارای شمار فراوانی پیکسل می‌باشد را با یکدیگر مقایسه کنیم. همه کشور ایران در دامنه جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۰ تا ۶۵ درجه طولی که در بر گیرنده نزدیک به ۲۵۰ پیکسل $2.5^{o} * 2.5^{o}$ است، به عنوان نمونه آزمایشی نگریسته شد. برای نمونه، انجام این آزمون معنی‌دار بودن اختلاف میانگین آب قابل بارش دوره ۲۹ ساله نخست با میانگین همین پراسنج در دوره ۲۹ ساله دوم برای روی هم این ۲۵۰ پیکسل را ارزیابی خواهد نمود. این آزمون برای هر سه پراسنج مورد آزمایش یعنی آب قابل بارش، نم ویژه و باد به انجام رسید.

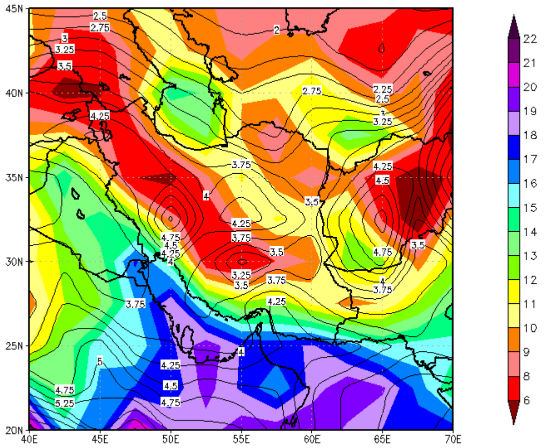
نتایج

میانگین آب قابل بارش و نم ویژه (دوره ۱۹۸۸ -۱۹۶۰)

در شکل ۱ میانگین آب قابل بارش (PW) زمستانه (ژانویه– مارس) و نم ویژه (SH) برای تراز ۸۵۰ میلی‌باری در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۸ نشان داده شده است. بیشترین اندازه میانگین PW در کناره های دریای عمان، خلیج فارس و دریای خزر دیده شد. کمترین اندازه این پراسنج از شمال باختری (شمال غربی) کشور تا پهنه‌های مرکزی ایران و در امتداد رشته کوه‌های زاگرس گسترده شده است. در استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی نیز اندازه آب قابل بارش کمترین اندازه است. اندازه میانگین PW در کناره‌های دریای عمان و خلیج فارس ۱۲ تا ۱۷ و کناره‌های دریای خزر۱۰ تا ۱۱ کیلوگرم بر متر مربع (kg/m^2) در نوسان است. دامنه نوسان این پراسنج در پهنه-های خاوری ایران میان ۹ تا ۱۱، شمال خاوری ۹ تا۱۰ و نواحی مرکزی کشور ۶ تا ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع در نوسان است.

ناهمساز با اندازه میانگین PW بیشترین اندازه میانگین SH در امتداد رشته کوه‌های زاگرس از شمال باختر کشور تا پهنه‌های باختری، جنوب باختری دیده شد. بیشترین اندازه وابسته به استان‌های ایلام و خوزستان است. اندازه این پراسنج در سراسر کشور از نزدیک به ۲/۷۵ تا ۵ گرم آب در کیلوگرم هوا در نوسان می‌باشد. اندازه میانگین SH در پهنه جغرافیایی شمال باختر کشور و در پهنه کوه‌های زاگرس از ۴/۲۵ تا ۵ گرم آب در کیلوگرم هوا در نوسان است. اندازه این سنجه در مرکز کشور ۴/۲۵، پهنه شمال کشور از ۲/۷۵ تا ۴، بخش‌های باختری کشور از ۳/۵ تا ۴ و پهنه‌های جنوبی کشور از ۳ تا ۴/۲۵ گرم آب در کیلوگرم هوا (g/kg) نوسان می‌کند. یافته‌ها نشانگر آن است که کوهستان‌ها نقش بزرگی در افزایش نم ویژه و کاهش اندازه PW دارند. هر چه ارتفاع زمین افزایش یابد و از بلندای ستون هوا کاسته شود، اندازه آب قابل بارش کاهش می‌یابد. افزایش بارش در نواحی کوهستانی ناشی از بیشترین اندازه آب قابل بارش نیست بلکه گذر پیوسته هوای سرد نزدیک اشباع از روی این پهنه‌ها سرچشمه باران‌زایی می‌باشد. در پهنه دریای خزر و کناره‌های آن آب قابل بارش کمتر از گستره آب‌های جنوبی کشور است.

1- National Center for Atmospheric Research



شکل ۱- نقشه میانگین سه ماهه ژانویه تا مارس برای دو پراسنج میانگین آب قابل بارش (PW) و نم ویژه (SH) برای تراز ۸۵۰ میلی بار برای بازه زمانی ۱۹٦۰ تا ۱۹۸۸

در این نقشه برای نشان دادن آب قابل بارش (kg/m^2) از رنگ‌ها و برای و نم ویژه (g water /kg air) از خطهای کانتور بهره‌گیری شد.

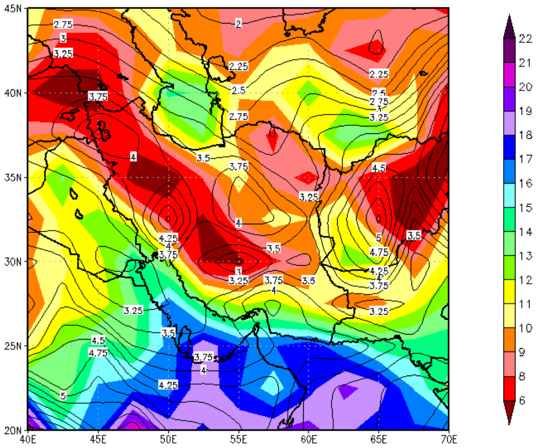
Figure 1- Mean values of seasonal (Jan-Mar) perceptible water (PW) and specific humidity (SH) (for the 850 mb level) over the period of 1960 to 1988

Perceptible water (kg/m^2) and specific humidity (g water/ kg air) are shown by shading and contour lines, respectively.

میانگین آب قابل بارش و نم ویژه (دوره ۲۰۱۷ -۱۹۸۹)

شکل ۲ همانند شکل ۱ ولی بـرای بـازه زمـانی ۱۹۸۹ تـا ۲۰۱۷ است. در این دوره نیز بیشـترین انـدازه میـانگین PW در کنـاره‌هـای دریای عمان و خلیج فارس و بـر روی دریـای خـزر دیـده مـی‌شـود. کمترین اندازه این پراسنج جوی در امتداد کوههای زاگـرس از شـمال باختری تا پهنه های مرکزی کشور گسترده شده اسـت. گرچـه انـدازه PW و SH در دو دوره یکسان نیست، الگـوی پـراکنش آنهـا در دوره نخست و دوم همانندی فراونی با یکـدیگر دارنـد. در دوره دوم انـدازه میانگین PW در نواحی بیشتری از پهنه‌های کوه زاگرس کاهش یافته و به کمتر از ۶ کیلوگرم بر متر مربع رسیده است. کاهش در اندازه آب قابل بارش در پهنه‌های شمال خاور (شمال شرق) و مرکـز نیـز دیـده می‌شود.

برای دریافتی بهتـر از چگـونگی تغییـرات در انـدازه پراسـنج‌هـا، تفاضل اندازه PW، SH و VW برای دوره ۲۹ سـاله دوم از دوره اول در شکل ۳ نشان داده شده است. به دیگر سـخن، شـکل ۳ نمایشـگر تفاوت اندازه پراسنج‌های دو شکل ۱ و ۲ است که تفـاوت انـدازه بـاد برداری نیز بدان افزوده شده است. اندازه منفی یا مثبت پراسـنجهـا در روی شکل به ترتیب نشانگر کمتر یا بیشتر بودن انـدازه آنهـا در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۹ در سنجش به دوره ۱۹۸۸ -۱۹۶۰ است. همانگونه کـه دیده می‌شود، کم و بیش در سراسر ایران اندازه آب قابل بارش عددی منفی را نشان می‌دهد که به روشنی نشان از کاهش ایـن پراسـنج در دوره ۲۹ ساله دوم (با سال پایانی ۲۰۱۷) است. بیشترین انـدازه منفـی ۲/۵ کیلوگرم آب در ستون هوا می‌رسد که هسـته آن بـر روی کشـور کویت، خوزستان ایران، بخـش‌هـایی از شـمال عربسـتان سـعودی و استان بصره عراق جای دارد.



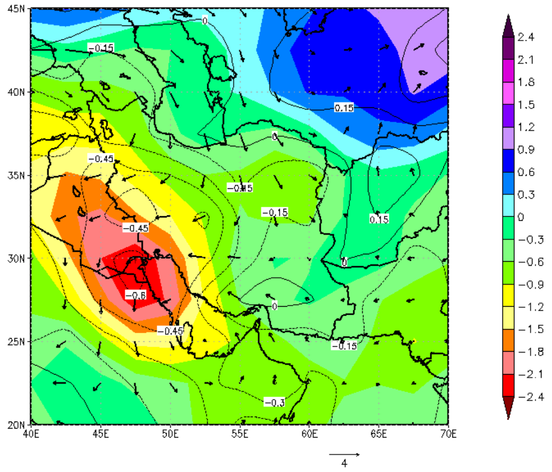
شکل ۲- همانند شکل ۱ ولی برای بازه زمانی ۱۹۸۹ تا۲۰۱۷

Figure 2- like Figure 1 except for the period of 1989-2017

در درون کشور، بیشینه کاهش در استان‌های جنـوب بـاختری در برگیرنده استان‌های بوشهر، خوزستان، فارس، کهکیلویه و بویراحمـد، ایلام و کرمانشاه دیده می شود. در شکل ۳، نم ویـژه نیـز یـک رونـد کاهشی در دوره دوم (سال پایانی ۲۰۱۷) را نشان می‌دهـد و الگـوی پراکنش جغرافیایی آن هماهنگی نزدیکی با الگوی پراکنش آب قابـل بارش دارد. در استان‌های یاد شده، نم ویژه نیز نزدیک بـه ۰/۴۵ گـرم بر کیلوگرم افت نمـوده اسـت. افـزون بـر ایـران، کشـورهای عـراق، عربستان سعودی، کویت، بحرین و قطر نیز با کاهش آب قابل بـارش و نم ویژه روبرو بوده‌اند. ناهمساز با بخش‌های جنوبی نقشه، بیشـترین افزایش در آب قابل بارش و نم ویژه در عرض‌های بـالای ۴۰ درجـه شمالی در کشور تاجیکستان (شمال خاوری نقشه) دیده می‌شود.

سـرعت و جهـت بـاد نیـز در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۹ دگرگـونی چشمگیری را نسبت به دوره پیشین ۲۹ ساله خود نشان مـی‌دهـد. در سنجش به دوره نخست، برای سال‌های پس از ۱۹۸۹، میانگین جهت باد در جنوب ایران، عربستان سعودی، عراق شمال‌وزان (از شـمال بـه جنوب) و خاور وزان (شرق‌وزان، از شرق به غرب) بوده است. به دیگر سخن، در سنجش بـه دوره ۱۹۶۰-۱۹۸۸ سـرعت و پایـداری زمـانی بادهای باختروزان (غرب‌وزان) و جنـوب وزان کمتـر شـده اسـت و در برابر، وزش بادهایی که از خاور (شرق) و یا از شمال سـر چشـمه مـی گیرند از سرعت و پایداری بیشتری برخوردار شده‌اند. یـادآور مـی‌شـود که بادهای باختروزان و جنوب‌وزان نم را از دریای مدیترانه، اقیـانوس اطلس و یا اقیانوس هند و خلیج فارس به ایـران زمـین و کشـورهای

پیرامونی آن می‌رسانند. در برابر بادهای شمال‌وزان و خاوروزان، به جز در روی دریای خزر، نم چندانی را برای ایران به همراه نداشته و تولید بارش چندانی نمی‌نمایند. بنابراین کاهش آب قابل بارش و نم ویژه در دوره دوم در پیوند نزدیک با تغییر ویژگی‌های باد روی ایران می‌باشد.



شکل ۳- تفاضل میانگین سه ماهه ژانویه تا مارس برای (PW)، (SH) و (VW)، (دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷ از ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۸ کم شده است)

اندازه‌های منفی (مثبت) نشانگر آن است که مقدار پراسنج در دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷ کمتر (بیشتر) از اندازه آن در دوره ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۸ بوده است. آب قابل بارش به شکل رنگی بر حسب کیلوگرم بر متر مربع، نم ویژه به شکل خطوط کانتور بر حسب گرم آب بر کیلوگرم هوا و خطوط فلش جهت و سرعت باد برداری بر حسب متر بر ثانیه نشان داده شده است.

Figure 3- Differential values of the perceptible water (shading, g /m2), 850 mb specific humidity (contours, g/kg) and 850 mb vector wind (arrows m /s) between the 1989-2017 and 1960-1988

The negative (positive) values of the perceptible water and specific humidity infer that the amount of these variables during the period of 1989 to 2017 is less (more) than corresponding values over the period of 1960-1988. Arrows indicates the prevalent wind direction during the recent period.

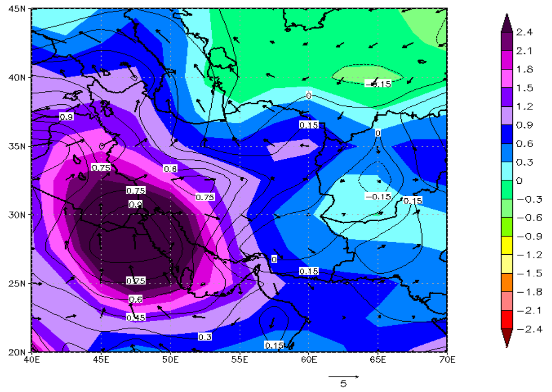
گسترش پهنه‌های جنگلی در استان‌های جنوبی ایران می‌تواند نقش ارزنده‌ای در پیشگیری کاهش دما در زمستان داشته باشد. هر چه پوشش گیاهی کمتر باشد، دامنه نوسان‌های روزانه و فصلی دما بیشتر می‌گردد و دمای هوا بویژه در شب‌ها و زمستان‌ها از کاهش بیشتری برخوردار می‌شود. این کاهش دما به نوبه خود پهنه‌های پر فشار در ایران و بویژه بخش جنوبی را افزایش می‌دهد. کاهش بارش و نم هوا از پیامدهای افزایش فشار در این بخش از کشور می‌باشد.

شکل ۳ گویای آن است که در سنجش با دوره دوم، در دوره نخست بی‌هنجاری چرخش هوا در پهنه جنوب باختری ایران و سرزمین‌های پیرامون آن در دیگر کشورهای همسایه، باختروزان و جنوب وزان است. این گردش هوا در دوره دوم بیشتر خاور وزان (شرق‌وزان) و شمال وزان شده است. با این چرخش در جهت بادها، بخار آب بالای خلیج فارس و دریای عمان بجای آنکه به استان‌های جنوبی و جنوب باختری ایران برسد، راهی پاکستان و بخش‌های شمالی هندوستان شده است. بنابراین، افزایش بادهای خاوروزان و شمال‌وزان (و یا کاهش نسبی در سرعت و مدت بادهای باختروزان و جنوب‌وزان) که به ترتیب در جنوب و مرکز ایران دیده می‌شود، با کاهش نم ویژه و آب قابل بارش در ستون هوا هماهنگ است.

ناهمساز با جنوب ایران، باد شمال وزان می‌تواند نم را از روی دریای خزر به سوی پهنه‌های کناری دریا در استان‌های گیلان، مازندران و گلستان روانه سازد. گرچه در دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۷ بادهای شمال وزان بر روی دریای خزر افزایش یافته است اما اندازه دو پراسنج نم ویژه و آب قابل بارش دوره دوم در سنجش به دوره ۱۹۶۰-۱۹۸۸ باز هم کاهش نشان می‌دهند. شکل ۳ نشانگر آن است که این بادها دارای جهتی به سوی استان گرگان در بخش جنوب خاوری دریای خزر هستند کاهش ارتفاع رشته کوهستان‌های البرز در استان گرگان در سنجش با استان گیلان می‌تواند تا اندازه‌ای اندازه منفی نم ویژه و آب قابل بارش در استان گرگان را توجیه نماید. چنانچه بادهای بر روی دریای خزر بیشتر به سمت بخش‌های باختری این دریا می‌وزید، به احتمال فراوان رشته کوه‌های بلند البرز در استان گیلان از گریز نم آنها به دیگر سرزمین‌ها جلوگیری می‌نمود و اندازه نم ویژه و آب قابل بارش در شمال ایران مثبت می‌شد.

جهت باد در گستره شمال خاوری شکل ۳ نشانگر نیرومند شدن چرخش سیکلونی هوا در این پهنه می‌باشد. به دیگر سخن، در دوره دوم، میان دریای خزر، بخش‌هایی از استان خراسان شمالی، شمال افغانستان، جنوب ترکمنستان و بخش‌های بزرگی از تاجیکستان جریان پاد ساعتگرد سیکلونی افزایش یافته است. بخش رو به جنوب این جریان سیکلونی که باران‌زایی چندانی ندارد در روی استان‌های گرگان و خراسان شمالی جای دارد و بخش شمال سوی آن بیشتر از همه جا در شمال افغانستان و کشور تاجیکستان جای گرفته است که به افزایش نم ویژه و آب قابل بارش در این پهنه‌ها می‌انجامد.

بی‌هنجاری آب قابل بارش در دوره های ۱۰ ساله (دوره ۱۹۶۰-۲۰۱۷)

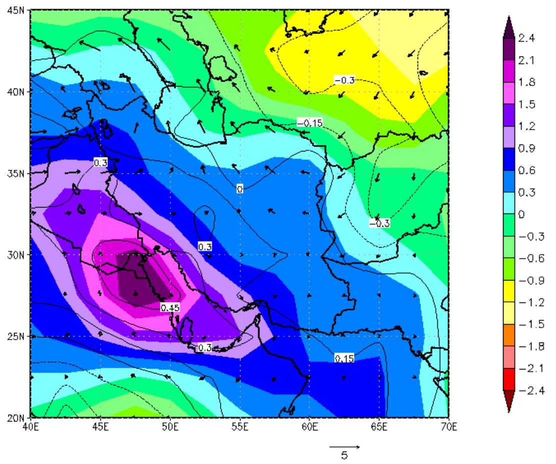


شکل ٤- بی‌هنجاری سه ماهه ژانویه تا مارس برای سه پراسنج آب قابل بارش (PW)، نم ویژه (SH) و جهت باد (VW) در تراز ۸۵۰ میلی‌بار برای بازه زمانی ۱۹٦۰ تا ۱۹٦۹

در این نقشه بی‌هنجاری آب قابل بارش به شکل رنگی بر حسب (kg/m^2) و بی‌هنجاری نم ویژه به شکل خطوط کانتور بر حسب گرم آب بر کیلوگرم هوا (g/kg) و خطوط فلش جهت و سرعت باد بر حسب (m/s) نشان داده شده است.

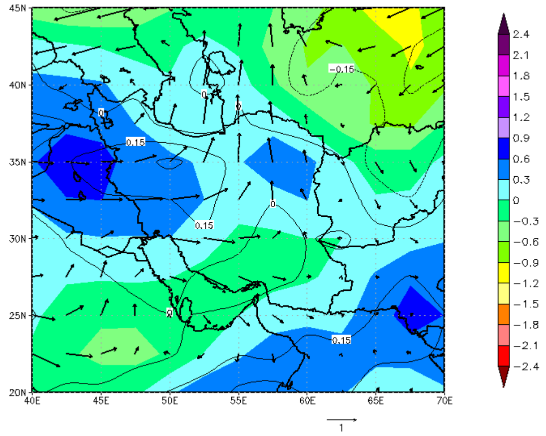
Figure 4- Anomaly values of seasonal (Jan-Mar) perceptible water (PW), specific humidity (SH) (for the 850 mb level) and vector wind over the period of 1960 to 1969

Perceptible water (kg/m^2) and specific humidity (g water/ kg air) are shown by shading and contour lines, respectively. Vectors show the direction of vector wind. The magnitude of wind speed is shown by a vector beneath the figure.



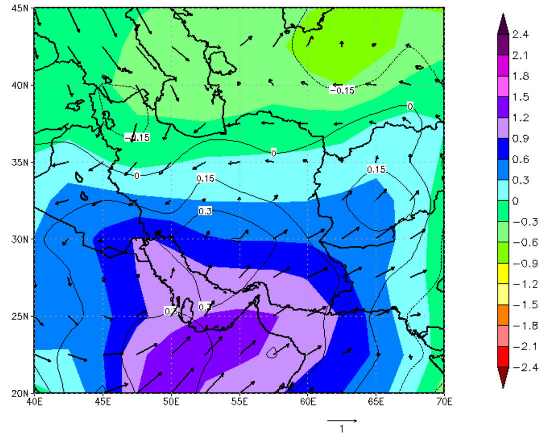
شکل ٥- همانند شکل ٤ ولی برای بازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۹

Figure 5– Like Figure4, except for the period of 1970 to 1979



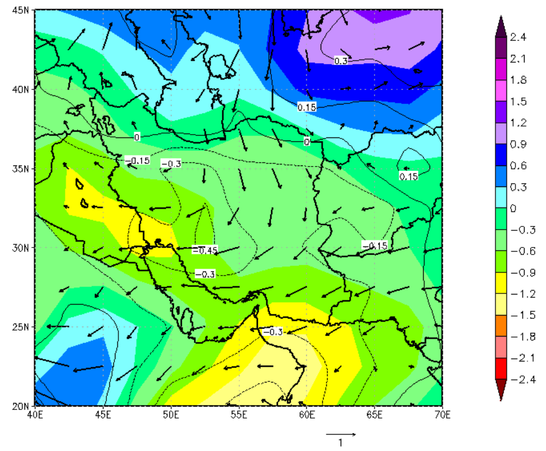
شکل ٦- همانند شکل ٤ ولی برای بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۹

Figure 6- Like Figure 4, except for the period 1980 to 1989



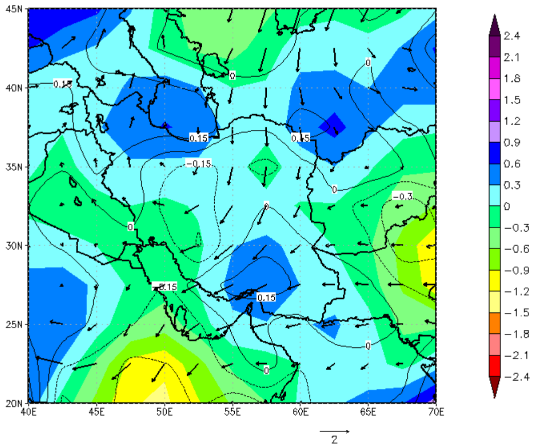
شکل ٧- همانند شکل ٤ ولی برای بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹

Figure 7- Like Figure 4, except for the period 1990 to 1999



شکل ٨- همانند شکل ٤ ولی برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹

Figure 8- Like Figure 4, except for the period 2000 to 2009



شکل ۹- همانند شکل ٤ ولی برای بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷
Figure 9- Like Figure 4, except for the period 2010 to 2017

بر پایه شکل ۴، در بازه زمانی ده ساله ۱۹۶۰ تا ۱۹۶۹ اندازه مثبت بی‌هنجاری PW به بیش از ۲/۴ کیلوگرم بر متر مربع در نواحی جنوب باختری ایران و سرزمین‌های همجوار در دیگر کشورها می‌رسد. همانند این بخش از ایران، بخش‌های بزرگی از جنوب عراق و نیز شبه جزیره عربستان، اندازه نم ویژه SH نیز مثبت می‌باشد. همانگونه که در بخش‌های بعدی دیده خواهد شد، در سنجش با دیگر دوره‌های ده ساله، دهه ۱۹۶۰ میلادی دارای بیشترین گستره جغرافیایی از اندازه مثبت بی‌هنجاری PW در پهنه‌های باختری و جنوب باختری ایران است. بی‌هنجاری بادها در گستره بزرگی از کشور باختروزان و جنوب وزان است. این نشانگر آن است که در این دوره ده ساله کشور در میدان کارکرد بادهای انباشته شده از آب است. اندازه بی‌هنجاری بادها بر روی دریای خزر نیز جنوب وزان است که شیبی به سوی کناره‌های باختری دریا دارند. این بادها نم هوا را به ساحل‌های باختری دریا می‌رانند تا در آن گستره‌ها نیز اندازه بی‌هنجاری دو پراسنج PW و SH مثبت باشد. در کناره‌های خاوری این دریا که بهره چندانی از بادهای شمال‌وزان ندارند، اندازه این دو پراسنج منفی است. در این دوره در جنوب باختری و به ویژه در مرکز کشور فواصل خطوط کانتور SH بسیار نزدیک به هم می‌باشد که این شیب تند بیانگر تغییرات فراوان این پراسنج در این پهنه‌ها می‌باشد.

گرچه دربازه زمانی ۱۹۷۰ تا ۱۹۷۹ اندکی کاهش در اندازه مثبت SH و PW دیده می‌شود، ولی به جز در استان‌های خراسان شمالی، گرگان و مازندران، در این دوره نیز بی‌هنجاری هر دو پراسنج در دیگر استان‌ها مثبت است (شکل ۵). بادهای جنوب وزان و باختر وزان از سرعت و پایداری کمتری برخوردارند و پهنه جغرافیایی که اندازه مثبت بی‌هنجاری PW و SH آن برابر دوره پیشین باشد، کمتر است. گرچه در این دوره بادهای باختر وزان و جنوب وزان کمتر شده است، اما یک جریان آنتی سیکلونیک در بخش شمال خاوری ایران پدید آمده است که خشکی را برای ایران و کشورهای افغانستان و تاجکستان در پی دارد. در سنجش به دوره ده ساله پیشین، در این دوره بادهای خشک خاوروزان که از کشور افغانستان به درون ایران می آیند، از پایداری و سرعت بالاتری برخوردار شده‌اند و بر بخش‌های بیشتری از استان خراسان و استان‌های کناری دریای خزر تاثیر می‌گذارند. بی‌هنجاری سرعت این بادها در هر دو دوره نسبت به دوره‌های ده ساله بعدی بالا است به گونه‌ای که بردار مقیاس این بادها در پایین هر دو شکل ۵ متر بر ثانیه و برای دیگر دوره‌ها یک تا دو متر بر ثانیه است. گرچه در سراسر کشور بیشنه بی‌هنجاری SH در هر دو دوره در جنوب باختری و کمینه آن در شمال خاوری دیده می شود، ولی در سنجش با دوره نخست، دامنه نوسان آن در دوره دوم کمتر است. این دو پراسنج در دوره دوم (میان ۰/۱۵- تا ۰/۴۵ گرم بر کیلوگرم) نسبت به دوره اول (میان صفر۰ تا ۰/۹ گرم بر کیلوگرم) کاهش یافته است. ناهمساز با دهه نخست، در دومین دهه خطوط کانتور به دور از یکدیگرند که نشانگر یکنواختی بیشتر نم در سراسر کشور است.

در سنجش با دوره ۱۹۶۹-۱۹۶۰، در بازه زمانی ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۹ بی‌هنجاری سرعت بادهای باختر وزان و جنوب وزان نزدیک به یک پنجم شده است که بسیار نگران کننده است (سرعت باد در شکل ۴ و ۶ مقایسه شوند). گرچه در این دوره بادهای باختر وزان و جنوب وزان بخش بزرگی از کشور را فرا گرفته‌اند ولی سرعت پایین آنها حرکت نم بسوی ایران را دشوار می‌سازد. از این رو، بی‌هنجاری PW در بخش‌های جنوبی ایران منفی و در بخش‌های باختری مثبت است. بالاترین اندازه بی‌هنجاری آب قابل بارش در بخش‌های خاوری کشور عراق جای دارد. بخشی از پهنه‌های جنوب و جنوب باختری ایران نیز با اندازه منفی آب قابل بارش روبرو هستند. سنجش این دوره با دو دوره پیشین آن اهمیت سرعت و جهت بادهای جنوب وزان و باختروزان در ترابری نم به درون ایران را روشن می‌سازد. هر چه این بادها از پایداری و سرعت بیشتری برخوردر باشند آب قابل بارش و نم ویژه درون ایران بیشتر است. در برابر، بادهای آنتی سیکلونیک که از افغانستان سرچشمه می‌گیرند و در استان‌های خراسان و پهنه‌های کناری دریای خزر می‌وزند بیشتر خشکی را به درون این گستره‌ها می‌پراکنند.

در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹، اندازه بی‌هنجاری بادهای جنوب وزان در نیمه جنوبی کشور و بادهای شمال وزان و خاور وزان (شرق وزان) در بخش‌های شمالی کشور مثبت است (شکل ۷). در حالی‌که افزایش بادهای جنوب وزان نم هوا در استان‌های جنوبی افزایش می-دهد، بادهای شمال وزان و خاور وزان، بجز درکناره‌های دریای خزر، خشکی بیشتر هوا در نیمه شمالی را در پی دارند. به دیگر سخن، در این دوران برای انومالی‌های باد، PW و SH یک حالت دو قطبی میان نیمه جنوبی و شمالی کشور دیده می‌شود که نمونه آن در سه

دهه پیش از آن رخ نداده بود. نمناکی از جنوب به شمال کشور روند کاهشی دارد و بیشنه اندازه بی‌هنجاریPW در جنوب کشور نمایان می‌گردد. نشان سامانه‌های نم‌سازی که از اقیانوس هند سرچشمه گرفته‌اند بر روی افزایش نم دربخش‌های بزرگی از ایران نمایان است. از آنجا که اندازه مثبت سرعت بادهای جنوب وزان در این دوره بسیار کمتر از دهه ۱۹۶۰ است، نفوذ نم به درون بخش‌های شمالی ایران چندان چشمگیر نمی‌باشد. در سنجش با سه دوره ده ساله پیشین، جهت انومالی باد بر روی دریای خزر بر عکس شده است که ارزیابی علت آن نیازمند بررسی های بیشتر است.

در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹، اندازه بی‌هنجاری PW و SH در سراسر کشور منفی می‌باشد که در سنجش باچهار دهه پیشین و یک دهه بعدی، چالش برانگیزترین دوره می‌باشد (شکل ۸). در این دوره بی‌هنجاری باد در نیمه شمالی کشور، شمال وزان و در بخش‌های جنوبی خاور وزان می‌باشد. به جز برای کناره‌های جنوبی دریای خزر، این بادها نم را از دیگر بخش‌های کشور بیرون می‌برند. برای نمونه، بردارهای باد در شکل ۸ و سنجش آن با شکل‌های ۴ تا ۷، گویای آن است که افزایش نم در بخش بزرگی از عربستان سعودی ناشی از رانش هوای نمناک از سوی ایران به درون این کشور است. در برابر، بخش‌های جنوب باختری و باختر ایران مانند استان‌های خوزستان، فارس، کهکیلویه و بویر احمد، ایلام، کرمانشاه و اصفهان یکی از خشک‌ترین دوره‌ها در این چند دهه را آزموده‌اند. همانگونه که در شکل ۸ دیده می‌شود، در این دوره ده ساله، بادهای نم دار جنوب وزان و باختر وزان دارای بی‌هنجاری‌های مثبت نیستند. نه تنها ایران، بلکه کاهش در اندازه بی‌هنجاری PW و SH گستره بزرگی از کشورهای جنوبی خلیج فارس (به جز بخش‌های میانی و باختری عربستان سعودی) را نیز در برگرفته است. با چنین سرنوشت یکسانی که ایران و کشورهای همسایه با یک دید نگریسته می‌شوند، نیاز به یک همکاری منطقه‌ای برای کاهش بحران‌های زیست محیطی بیش از پیش روشن می‌گردد.

شکل ۹ نشانگر آن است که در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ نیز بادهای شمال وزان و خاور وزان پهنه‌های گوناگون کشور را در بر گرفته است و اندازه آب قابل بارش و نم ویژه در بسیاری از جاها کمتر از میانگین دراز مدت می‌باشد. سنجش دو شکل ۸ و ۹ گویای آن است که در سنجش با دوره ۲۰۰۰-۲۰۰۹، در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ میانگین سرعت باد نزدیک دو برابر شده و نمناکی بهبود نسبی یافته است. بادهای خاور وزان که بر روی دریای عمان می‌وزند گاهی شکل آنتی سیکلونی گرفته و نم خوبی را به هوای استان‌های هرمزگان و جنوب فارس تزریق کرده‌اند. در بخش‌های شمالی کشور نیز سامانه آنتی سیکلونی شکل گرفته بر روی دریای خزر نم خوبی را در هوای استان‌های گیلان، قزوین، زنجان، اردبیل و آذربایجان پراکنده‌اند. ارزیابی‌های انجام شده نشانگر آن است که برای پهنه‌های جنوب باختری ایران میانگین نم هوا برای نزدیک به بیست سال آخر کمتر از میانگین دراز مدت بوده است. گرچه در دوران ۱۹۶۰-۱۹۶۹ این پهنه از کشور دارای بالاترین بی‌هنجاری مثبت در اندازهPW و SH را در سراسر ایران داشت، در سال‌های پس از ۱۹۷۰ میلادی روی هم رفته روند منفی را آزموده است.

آزمون کلموگروف – اسمیرونوف (K-S test)

جدول ۱ یافته‌های آزمون کلموگروف– سیمرونوف به منظور بررسی اختلاف معنی‌دار میان توزیع فراوانی بی‌هنجاری چهار پراسنج آب قابل بارش، نم ویژه و دو مولفه باد مداری (Zonal wind, U) و باد نصف النهاری (Meridional wind, V) برای دوره‌های ۱۰ ساله و در دامنه جغرافیایی جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۰ تا ۶۵ درجه خاوری در فصل زمستان را نشان می‌دهد. تایید فرض صفر (H_0, p>۰/۰۵) بیانگر آن است که در دو دوره مورد مقایسه توزیع فراوانی پراسنج مورد آزمون یکسان می‌باشد.عدم تایید فرض صفر (H_1, p<۰/۰۵) بر پایه ناهمسازی توزیع پراسنج‌ها در دوره‌های مورد مقایسه هستند (۱۱).

ستون ۱ جدول، دهه مورد سنجش پایه را نشان می‌دهد. ستون دوم دهه‌ای را نشان می‌دهد که داده های آن با داده‌های دهه ستون پایه آزموده شده است. ستون سوم (D) معیار آزمون است که فاصله دو تابع توزیع را بین دو نمونه مورد بررسی نشان می‌دهد و اندازه p-value در ستون چهارم آورده شده است. هنگامی‌که اندازه p-value از 0.05 بیشتر است نشانگر نبود اختلاف میان توزیع داده‌های دو دوره است. برای نمونه، p-value برای پراسنج PW به منظور سنجش میان دهه یک و دو برابر 0.18 و برای دهه یک و دهه سه تا شش صفر است. به بیان دیگر توزیع PW در سراسر پهنه ارزیابی شده برای دو دوره یک و دو اختلاف معنی داری در سطح آماری ۹۵٪ ندارند در حالی که توزیع این پراسنج در دوره یک با دوره‌های سه تا شش در گستره ایران دارای اختلاف معنی‌دار است. همانگونه که در جدول ۱ دیده می‌شود، بی‌هنجاری مولفه افقی باد (U wind) دهه اول (۱۹۶۰) با دیگر دهه‌ها دارای اختلاف معنی‌داری است (p<۰/۰۵). این اختلاف بیانگر آن است که با گذر زمان در دهه‌های گوناگون الگوی تغییرات این مولفه تغییر کرده است. همچنین توزیع بی‌هنجاری مولفه عمودی باد (V Wind) زمستانه در دهه اول با همه دوره‌های مورد بررسی مگر دهه ششم در سطح آماری ۹۵٪ دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشد. به دیگر سخن در سنجش با دهه اول، الگوی بادهای برداری در گذر زمان همراه با تغییرات معنی‌دار بوده است. افزون بر این ارزیابی توزیع مقادیر آب قابل بارش و نم ویژه در دهه نخست نشان از اختلاف معنی‌دار این دوره با دیگر بازه‌های بررسی شده مگر دهه ۱۹۷۰ (دهه دوم) در سطح آماری ۹۵٪ دارد. به دیگر سخن، میانگین هر یک از این دو پراسنج در دوره بیست ساله

نخست، تغییر چندانی نداشته است. این در حالیست که پس از سال ۱۹۸۰ میانگین آب قابل بارش و نم ویژه که از نشانگرهای شرایط رخداد بارش به شمار می‌روند، در سنجش با دهه ۱۹۶۰ با کاهش معنی‌دار روبرو بوده است.

مقایسه توزیع احتمالی بی‌هنجاری پراسنج‌های مورد بررسی در دهه ۱۹۷۰ با دهه‌های پس از آن نشان از اختلاف معنی‌دار همه آنها با یکدیگر می‌باشد. به دیگر سخن با گذر زمان در مقیاس دهه‌ای الگوی این پراسنج‌ها دستخوش تغییرات معنی‌دار بوده است. همچنین یافته‌ها روشن می‌سازد که در دهه سوم (۱۹۸۰ تا ۱۹۸۹) توزیع بی‌هنجاری مولفه‌های باد با همه دهه‌های پسین (۱۹۹۰ تا ۲۰۱۰) دارای اختلاف معنی‌دار در سطح آماری ۹۵٪ می‌باشد. افزون براین، اندازه نم ویژه و آب قابل بارش در این دهه با دهه بعدی (۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹) اختلاف معنی‌دار نشان نداده است این در حالی‌است که با دو دهه آخر (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) دارای اختلاف معنی‌دار می‌باشد. مقایسه اختلاف توزیع آب قابل بارش و رطوبت ویژه در دهه نخست و سوم با دیگر دهه‌ها نشان می‌دهد که در این توزیع در هر دو دهه با دهه پسین اختلاف معنی‌داری نداشته است. به بیان دیگر تا دهه ۲۰۰۰ این تغییرات پس از یک دوره بیست ساله چشمگیر می‌باشد. سنجش توزیع احتمالی بی‌هنجاری پراسنج‌های مورد بررسی در دهه چهارم (۱۹۹۰) و پنجم (۲۰۰۰) با دهه‌های پس از آن نشان از اختلاف معنی‌دار همه آنها با یکدیگر می‌باشد. به دیگر سخن در گذر سه دهه پیشین، مقیاس دهه‌ای الگوی این پراسنج‌ها دستخوش تغییرات معنی‌دار بوده است.

نتیجه‌گیری

از آنجا که بزرگترین بخش از بارش ایران در فصل زمستان روی می‌دهد، نوسان آب قابل بارش(pw)، نم ویژه (SH) و سرعت و جهت باد برداری (VW) در لایه ۸۵۰ میلی‌باری برای ایران و بخش هایی از کشورهای همسایه برای دوره سه ماه ژانویه، فوریه و مارس (فصل زمستان) ارزیابی گردید. در ابتدا میانگین PW و SH برای دو دوره ۲۹ ساله ۱۹۶۰ تا ۱۹۸۸ با اندازه‌های رو در روی آن در دوره ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۷ سنجش گردید. سپس، تفاضل این دو پراسنج‌ها که تفاضل باد برداری را نیز به همراه داشت در این دو دوره بررسی شد. در گام دوم، همه دوره (بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۷) به ۵ دوره ۱۰ ساله و یک دوره ۸ ساله بخش گردید و اندازه این پراسنج‌ها در هر دوره با یکدیگر سنجش گردیدند. از آزمون کلموگروف– اسیمرونوف برای بررسی ناهمسازی (اختلاف) معنی‌دار میان توزیع فراوانی SH ،PW و دو مولفه برداری باد (U wind and V wind) برای دوره‌های یاد شده بهره‌گیری شد.

جدول ۱- آزمون کلموگروف– اسیمرونوف (K-S test) برای داده‌های بی‌هنجاری آب قابل بارش (PW)، نم ویژه (SH) و مولفه‌های برداری باد (VW) در دوره‌های ۱۰ ساله

Table 1- Kolmogorov-Smirnov test (K-S test) for data anomaly perceptible water (PW), specific humidity (SH) and vector wind (VW) in period10 years

دهه اول First decade	دهه مورد ارزیابی Evaluated decade	آب قابل بارش (Precipitable water, PW)		نم ویژه (Specific humidity, SH)		مولفه افقی باد (U wind)		مولفه عمودی باد (V wind)	
		D	P-value	D	P-value	D	P-value	D	P-value
1	2	0.20	0.18	0.00	1.00	0.83	0.00	0.47	0.00
	3	0.82	0.00	0.52	0.00	0.50	0.00	0.92	0.00
	4	0.87	0.00	0.73	0.00	0.48	0.00	0.75	0.00
	5	0.97	0.00	0.83	0.00	0.55	0.00	0.88	0.00
	6	1.00	0.00	0.97	0.00	0.68	0.00	0.00	1.00
2	3	0.63	0.00	0.52	0.00	0.93	0.00	0.52	0.00
	4	0.70	0.00	0.73	0.00	1.00	0.00	0.55	0.00
	5	0.78	0.00	0.83	0.00	0.78	0.00	0.45	0.00
	6	0.90	0.00	0.97	0.00	0.60	0.00	0.47	0.00
3	4	0.20	0.18	0.30	0.01	0.93	0.00	1.00	0.00
	5	0.40	0.00	0.47	0.00	0.45	0.00	0.73	0.00
	6	0.72	0.00	0.83	0.00	0.72	0.00	0.92	0.00
4	5	0.35	0.00	0.27	0.03	0.98	0.00	0.98	0.00
	6	0.63	0.00	0.68	0.00	0.98	0.00	0.75	0.00
5	6	0.62	0.00	0.63	0.00	0.50	0.00	0.83	0.00

یافته‌ها نشان داد که در هر دو بازه زمانی ۲۹ ساله، الگوی پراکنش جغرافیایی PW و SH کم و بیش یکسان است. بر پایه این الگو، بیشترین اندازه میانگین PW در کناره‌های دریای عمان و خلیج فارس میان ۱۲ تا ۱۷ کیلوگرم بر متر مربع و کناره‌های دریای خزر۱۰ تا ۱۱ کیلوگرم بر متر مربع در نوسان است. کمترین اندازه PW از شمال باختری تا پهنه‌های مرکزی و جنوبی ایران در امتداد رشته کوه‌های زاگرس میان ۶ تا ۱۰ کیلوگرم بر متر مربع دیده شد. ناهمساز با میانگین PW، بیشترین اندازه SH در پهنه‌های کوه‌های زاگرس از شمال باختری تا گستره های مرکزی کشور میان ۴/۲۵ تا ۵ گرم بر کیلوگرم در نوسان بود. گرچه در این دو دوره ۲۹ ساله الگوی پراکنش PW و SH به هم نزدیک است اما اندازه‌های این پراسنجها در دوره دوم به گونه‌ای معنی‌دار کمتر از دوره نخست بود. انومالی باد نیز که در دوره ۱۹۶۰–۱۹۸۸ بیشتر جنوبی و باختری بود در دوره ۱۹۹۰–۲۰۱۷ به شمالی و خاوری دگرگونی یافته بودند. از آنجا که بادهای جنوبی و باختری نقش بزرگی در شار نم هوا بسوی ایران دارند، کاهش آنها در دوره دوم با کاهشی که در اندازه‌های PW و SH دیده شد، هماهنگ است. برای دوره دوم ۲۹ ساله، بیشترین اندازه کاهش PW و SHدر استان‌های جنوب باختری در برگیرنده استان‌های بوشهر، خوزستان، فارس، کهکیلویه و بویراحمد و ایلام و کرمانشاه دیده شد.

در میان دوره‌های ده ساله بیشترین اندازه مثبت بی‌هنجاری PW و SH به ترتیب بیش از ۲/۴ کیلوگرم بر متر مربع و۰/۹ گرم بر کیلوگرم در پهنه‌های جنوب باختری در بازه زمانی ۱۹۶۰ تا ۱۹۶۹ دیده شد. شوربختانه این بی‌هنجاری مثبت در بخش‌های جنوب باختری ایران گذر زمان رو به کاهش نموده است، به گونه‌ای که در دهه های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ این بی‌هنجاری منفی شد و به نزدیک به از ۱/۱- کیلوگرم بر متر مربع برای PW و ۰/۴- گرم بر کیلوگرم برای SH افت نمود. از آنجا که در دوره ۲۰۱۰–۲۰۱۷ روند مثبتی در این داده‌ها دیده شد، می‌توان گفت که آمار دوره ۲۰۰۰–۲۰۱۰، کمترین اندازه این پراسنجها در کشور و بویژه جنوب باختری آن بودند. گرچه در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۷ اندازه PW و SH تا اندازه‌ای در سراسر کشور افزایش یافت ولی باز هم در سنجش با دوران پیش از ۱۹۹۱ کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد. اندازه بی‌هنجاری PW از سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ در سراسر کشور منفی می‌باشد که این دوره در بین شش دوره ۱۰ ساله مورد بررسی چالش برانگیزترین دوره خشک می باشد. اندازه انحراف از میانگین SH نیز در این دوره در سراسر کشور منفی و بیشینه آن ۰/۴۵- گرم بر کیلوگرم در گستره‌های کوچکی از استان‌های فارس، کهکیلویه و بویر احمد و اصفهان می‌باشد. روشن شد که بی‌هنجاری مثبت در سرعت و جهت بادهای باختر وزان و جنوب وزان افزایش اندازه PW و SH را به دنبال دارد. در برابر، بادهای شرق‌وزان و شمال‌وزان کاهش این پراسنجها را در پی دارد.

منابع

1. Adeyemi B. 2009. Empirical modeling of layered integrated water vapor using surface mixing ratio in Nigeria. Journal of Applied Meteorology and Climatology 48(2):369-380.
2. American Meteorological Society, Precipitable Water Vapor, Glossary of Meteorology. Available at http://glossary.ametsoc.org/wiki/Precipitable_water,(visited 5 October 2015).
3. Amiri M.J., and Eslamian S.S. 2010. Investigation of climate change in Iran. Journal of Environmental Science and Technology 3: 208–216.
4. Asakereh H., and Doostkamian M. 2014. Tempo-spatial changes of perceptible water in the atmosphere of Iran. Iran-Water Resources Research 10(1): 72-86. (In Persian with English abstract)
5. Asakereh H., and Dustkamiyan M. 2015. Investigate the role of spatial distribution - the maximum dispersion of atmospheric precipitable water in Iran. Journal of Applied Geosciences Research 15(36):7-26. (In Persian)
6. Choy S., Wang C.S., Yeh T.K., Dawson J., Jia M., and Kuleshov Y. 2015. Precipitable water vapor estimates in the Australian region from ground-based GPS observations. Advances in Meteorology 2015(5): 1-14.
7. Dai A., and Trenberth K.E. 2004. The diurnal cycle and its depiction in the Community Climate System Model. Journal of Climate 17(5): 930-951.
8. Dehghani T., Salighe M., and Alijani B. 2018. The effect of climate change on the precipitable water content in the north coast of the Persian Gulf. Journal of Geographical Sciences 18:75-91. (In Persian with English abstract)
9. Dessler A.E., Zhang Z., and Yang P. 2008. Water vapor climate feedback inferred from climate fluctuations, 2003–2008. Geophysical Research Letters, 35(20).
10. Fallah Ghalhari Gh.AS. 2011. Essentials and fundamentals of Meteorology. Publications of the Institute of Climatology, First Edition.
11. Marsaglia G., Tsang W., and Wang J. 2003. Evaluating Kolmogorov's distribution. Journal of Statistical Software, 8(18).
12. IPCC, ClimateChange. 2013. ThePhysicalScienceBasis.Contri-bution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.

13. Karimi V., Karami E., and Keshavarz M. 2018. Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. Journal of Integrative Agriculture 17(1): 1-15.
14. Katiraei P.S., Arkyan F., and Rezaei Farkosh R. 2011. Trend of humidity (specific and relative) in synoptic stations in Iran in period 1976-2005. Journal of Marine Science and Technology Research 6(2): 19-30. (In Persian with English abstract)
15. Kiehl J.T., and Trenberth K.E. 1997. Earth's annual global mean energy budget. Bulletin of the American Meteorological Society 78(2): 197-208.
16. Mieruch S., Noël S., Bovensmann H., and Burrows J.P. 2008. Analysis of global water vapour trends from satellite measurements in the visible spectral range. Atmospheric Chemistry and Physics 8(3): 491-504.
17. Mobasheri M.R., Farajzadeh Asl M., and Sadeghi Naeini A. 2010. Total precipitable water (TPW) assessment using MODIS images radiosonde data (Case study: Tehran District). The Journal of Spatial Planning (Modares Human Sciences) 14(1): 107-126. (In Persian)
18. Mohammadiha A., Memarian M.H., Majid Azadi M., and Reyhani Parvari M. 2014. Study of WRF model predictions for precipitable water and its relation with estimated precipitation by Tehran weather Radar. Iranian Journal of Geophysics 8(3): 1-13. (In Persian with English abstract)
19. Sadeghi Hosseini S.A.R., Hajam S., and Tofangsaz P. 2005. A study of the relationship between precipitable water and observed precipitation over Tehran. Journal of the Earth and Space Physics 31(2): 13-21. (In Persian with English abstract)
20. Nazemosadat S.M.J., Samani N., Barry D.A., and Molaii Nikoo M. 2006. ENSO forcing on climate change in Iran: Precipitation analysis, Iranian Journal of science and Technology 30(B4): 555-565.
21. Nazemosadat S.M.J. 2015. Fundamentals of Meteorology and Climatology, Published by the publication center of the Iran's Ministry of Higher Education, 460 p, 2010.
22. Pazhoh F. 2019. Trend Analysis of Tropospheric Specific Humidity over Iran, Ph.D. thesis, Kharazmi University.
23. Ross R.J., and Elliott W.P. 1996. Tropospheric water vapor climatology and trends over North America: 1973–93. Journal of Climate 9(12): 3561-3574.
24. Shariatmadari Z. 2012. General meteorology. Parsia Publications, First Edition.

Journal of Water and Soil
Vol. 34, No. 6, Jan.-Feb. 2021, p. 1337-1349

نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)
جلد ۳۴، شماره ۶، بهمن – اسفند ۱۳۹۹، ص. ۱۳۴۹-۱۳۳۷

Climate Change in Iran Based on Changes in Precipitable Water, Specific Humidity and Wind Data

S.M.J. Nazemosadat[1]*- L. Abbasi[2]- S. Mehravar[3]
Received: 09-04-2019
Accepted: 02-11-2020

Introduction: Based on the research and assessment carried out during the Climate Change Enabling Activity Project under United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and using the scenarios proposed by IPCC, it is estimated that if the CO2 concentration doubles by the year 2100, the average temperature in Iran will increase by 1.5-4.5°C which will cause significant changes in water resources, energy demand, agricultural products and coastal zones. The present study is aimed to investigate the characteristics of climate change in Iran and some parts of the neighboring countries. Identifying the spatio-temporal changes in three atmospheric variables comprising perceptible water (PW), specific humidity (SH) and vector wind (VW, U and V components) over 1960-2017 was the main themes of the study.

Materials and Methods: Monthly values of these variables during wintertime (January to March) were extracted from the CDC/ Reanalysis 2/ NOAA in 2.5 * 2.5 grids for the period of 1960-2017. The study area locates between 20º to 45º N and 30º to 70º E. After averaging monthly data into seasonal series, as first step, significant changes in the considered series were investigated between two equal periods having 29 years of data (1960-1988 and 1989-2017). In the second step, the 58 years of the study period were divided into five successive decades (1960-2009) and a period with eight years (2010-2017). The Kolmogorov-Smirnov (K-S) field significant test was used for assessing the spatio-temporal difference between the obtained maps associated with various decades.

Results and Discussion: According to Figures 1 and 2, for both of the 29-year time-scales (1960-1988 and 1989-2017), PW was maximum (12 to 17 kg/m^2) alongside the northern coasts of the Persian Gulf and the Oman Sea. After this, PW had the highest values over the southern coasts of the Caspian Sea (10 to 12 kg/m^2). Oppose to these coastal areas, minimum values of this variable with about 6 to 10 kg/m^2 were associated with the Zagros mountains. In general, PW exhibited an inverse relationship with elevation. In contrast to PW, SH maximized (4.2 to 5 g/kg) over the Zagros ranges and its relationship with elevation was generally positive. The lowest value of the SH data was about 3.5 g/kg suggesting relatively low variation in the SH data within the country. Compared to the 1960-1988 period, a significant decline was observed in the values of PW and SH in 1989-2017. Although this decline was obvious over all parts of the country, it was slightly significant for the southwestern (northwestern) districts. Compared to the first half of the study period (1960-1989), PW (or SH) decreased by about 2.5 kg/m^2 (or 0.6 g/kg) in southwestern and 0.3 kg/m^2 (or 0.15 g/kg) in northwestern parts of Iran for the recent half (1989-2017). Differences between wind data during these two time-periods were mostly either northerly or easterly suggesting a significant decrease in the rain-bearing southerly or westerly circulation over 1989-2017. Anomalies of the near-surface wintertime winds were mostly found to be southerly or westerly during 1960-1988 implicating the possibility of moisture transport from the Persian Gulf, the Oman Sea, the Mediterranean Sea, and the Red Sea into the most parts of Iran. Conversely, the anomalies were either northerly or easterly in1989-2017 suggesting less moisture transport into Iran for this recent period.

In the decadal time-scale, maximum values of PW, SH, as well as southerly or westerly circulations, were observed during 1960-1969. The given results suggest that the enhanced (or suppressed) values of PW and SH are generally harmonized with the strengthened southerly and westerly (or northerly and easterly) wind anomalies. For this period, prevailing of southeasterly winds over the Caspian Sea enhanced or suppressed the measure of PW, SH over the western or eastern coasts of the Sea, respectively. Even though the mentioned atmospheric circulation patterns were generally similar for the 1960-1969 and 1970-1979 decades, positive anomalies of PW and SH, as well as the westerly and southerly airflows, were slightly suppressed for the second decade. The anomalies of westerly and southerly winds decreased by about one-fifth for 1980-1989 as compared with that in 1960-1969 resulting in a significant decrease in the PW and SH data for this decade. Although these

1, 2 and 3- Professor, Graduate and Master of Water Engineering, Center for Atmospheric and Oceanic Research, Shiraz University, respectively.
(*- Corresponding Author Email: mjnazemosadat@gmail.com)
DOI: 10.22067/jsw.v34i6.76456

anomalies were slightly positive over most parts of Iran, their weakness did not allow significant improvement in the PW and SH values. The period of 2000-2009 was evaluated as the driest decade of the study period for which the negative anomalies of PW and SH, as well as westerly and southerly circulations, were maximized (in absolute values). In spite of the fact that these undesirable conditions have recovered during the period of 2010-2017, PW and SH were still very low for this recent period. With the exception of the 1990-1999 decade, PW and SH have continuously decreased for the decades after 1970. The rain-bearing southerly and westerly winds have been gradually replaced with dry northerly or easterly wind during the recent periods.

Conclusion: The findings showed that the PW and SH distribution patterns are close together in the 29-year periods, the measures were, however, significantly smaller in the second period than in the first. The wind anomalies, which were mostly southerly and westerly in 1960-1988, have been changed to northerly and easterly in 1989-2017. Since the southerly and westerly winds play an influential role in moisture transfer to Iran, their reduction in the second period is consistent with the observed decrease in PW and SH. Among the ten-year periods, the highest positive PW and SH abnormalities are associated with the 1960 and 1969 decade. This positive anomaly decreased over the time. Since a positive trend is observed for 2010-2017, it can be concluded that 2000-2010 is the driest decade of the study period. The positive anomalies of westerlies (easterlies) and southerlies (northerlies) increased (decreased) the magnitudes of PW and SH.

Keywords: Climate change, Iran, Precipitable water, Specific humidity, Wind